

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-24

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

MECANISMOS DE FALLA Y DEGRADAMIENTO DE BOBINAS DE HIDROGENERADORES

ARMANDO SALAZAR G.
C. F. E.-LAPEM
México

Resumen *– Para realizar una mejor gestión de activo en lo referente al parque de generadores hidroeléctricos, se requiere de una metodología de diagnóstico confiable que nos permita conocer el estado actual de nuestros generadores, a fin de determinar el tipo de mantenimiento, rehabilitación o bien la sustitución parcial o total de los activos indicados. Considerando que el sistema aislante de los devanados de un generador determina la vida útil del mismo, y que la C. F. E. tiene un parque significativo de generadores hidráulicos, entre 100 y 350 MVA, con más de 30 años de servicio, el presente estudio está enfocado en una metodología para evaluación del aislamiento de las bobinas extraídas de los devanados de 3 estator; la cual, contempla un programa integral y multidisciplinario de ensayos destructivos y no destructivos de laboratorio, a fin de determinar los mecanismos de degradamiento más significativos que nos permita una optimización en la gestión del mantenimiento que impacte los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los equipos indicados*

No se contempla la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado; sin embargo, se hacen observaciones a la especificación de C. F. E. NRF 021, en lo referente a los ensayos a bobinas prototipo.

Palabras clave: Aislamiento eléctrico, mecanismo de degradamiento, extensión de vida, mantenimiento basado en condición, descarga parcial, gestión de activos

1 INTRODUCCIÓN

Existen varias publicaciones técnicas con respecto a la estadística de fallas de generadores hidroeléctricos [1], destacando en primer lugar las fallas de aislamiento eléctrico con un 56% de los casos, siendo la causa raíz con más incidencias el envejecimiento impactando con un 31%. Por lo anterior, las empresas generadoras de energía eléctrica están preocupadas para realizar una mejor gestión de activo de sus generadores, que les permitan determinar la extensión de vida, rehabilitación o sustitución parcial o total de sus activos para una óptima toma de decisiones que garantice la mayor disponibilidad y confiabilidad de sus procesos productivos.

La CFE tiene una capacidad total instalada de 51.5 GW (162 unidades), de la cual el 21.74% (11.2 GW.) son de generación hidroeléctrica. La región de Generación Hidroeléctrica Grijalva de la C. F. E. tiene una

* Dirección postal completa del Autor principal (opcional) – e-mail (obligatorio)

aportación aproximada de 5000 MVA, y la mayoría de sus generadores tienen ya más de 30 años de servicio; es decir, cumplieron la vida promedio útil garantizada por el fabricante,
Como referencia, La falla del sistema de aislamiento del generador hidroeléctrico U1 de la C. H. 15 de septiembre en la Republica de El Salvador ocurrida en el 2006, y la falla de la C. H. Valentín Gómez Farías U2, de la C.F. E., ocurrida en el 2010; represento una pérdida total y parcial, respectivamente, de los generadores. Por lo que se propone una metodología que permita mitigar este tipo de fallas catastróficas, y contribuya a una mejor gestión del mantenimiento de los hidrogeneradores.

2 GENERALIDADES

2.1 Metodología de Diagnóstico

Incluye un protocolo de pruebas destructivas y no destructivas que contemplan las áreas del conocimiento eléctrico, Mecánico y químico aplicado a bobinas extraídas de los devanados de estatores con más de 30 años de servicio.

Los ensayos contemplados por la metodología son:

- Pruebas Dieléctricas: Inspección Visual, Factor de disipación, Capacitancia, Descargas Parciales y ruptura dieléctrica.
- Pruebas Físico-Químicas: Macroscopia digital del aislamiento, Espectrometría diferencial por rayos x, Termo gravimetría, Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier.

2.2 Estadística y Mecanismos de fallas

Debido a la ausencia de una base de datos significativa de fallas de 2eléctricos dentro de la C. F. E., se consulta la referencia del CIGRE [1] con una muestra de 1200 hidrogeneradores y 70 incidencias de falla siendo de mayor impacto las fallas del aislamiento, destacando el envejecimiento de los devanados, con un de los casos, como la más frecuente dentro de este segmento.

Finalmente, se consulto la referencia [7], estadística de los países escandinavos con una muestra de 130 hidrogeneradores y un índice de incidencia de fallas al respecto de 26 casos, a fin de conocer los modos más frecuentes de envejecimiento del sistema aislante de generadores; los cuales, quedan resumidos en la siguiente tabla:

TABLA I: CAUSA RAIZ DE FALLAS DE AISLAMIENTO

#	Causa Raíz	(%)
1	Envejecimiento por No. de horas de operación	15
2	Envejecimiento por ciclos térmicos	38
3	Envejecimiento por descarga parcial interna y externa	27
4	Condición mecánica	8
5	Vibraciones	8
6	Contaminación	4

2.3 Factores que afectan la vida del aislamiento

Para los ingenieros de diseño las propiedades más significativas son: Contenido de resina, espesor de la mica, rigidez dieléctrica y grado de adhesión del encintado

Los procesos más importantes que afectan la calidad en la fabricación de barras y bobinas son: Uniformidad en la aplicación del encintado, Selección del tiempo y condiciones del ciclo de curado, cuidar los radios de curvatura y prevenir el daño mecánico de la cinta como pliegues, fisuras dobleces, etc.
Las investigaciones han demostrado que si el aislamiento es homogéneo, la rigidez dieléctrica y la durabilidad del aislamiento se determinan por las técnicas de fabricación de las bobinas; sin embargo, existe una amplia variabilidad en las predicciones de vida debido a que no existe un producto homogéneo perfecto.

La clave de un proceso de fabricación y la utilización de materiales aislantes exitosos reside en los siguientes puntos:

- La cinta de mica debe tener el espesor, contenido de resina y flexibilidad apropiado.
- El encintado debe aplicarse estrictamente a medio traslape
- Selección de la temperatura y duración del ciclo de curado para suministrar una óptima impregnación y ausencia de burbujas de aire en la aplicación de la resina a la cinta de mica.

Distorsiones en la forma interna del doblado o pliegues en la cinta provocaran concentraciones de campo eléctrico que aceleraran el degradamiento del sistema aislante

2.4 Esfuerzos de Degradamiento del Sistema Aislante

Existen varios esfuerzos de envejecimiento que afectan la vida útil del sistema aislante de los devanados del estator tales como los esfuerzos eléctrico, térmico, mecánico y químico y ambiental. Los esfuerzos indicados anteriormente impactan en diferente grado al Sistema aislante, existiendo hipótesis de algunos centros de investigación de que el esfuerzo más significativo es el esfuerzo eléctrico [4], hay quienes postulan que es el esfuerzo térmico [5], y algunos otros estudios más recientes han determinado que es el esfuerzo mecánico el de mayor impacto, y la interacción simultanea del resto de los esfuerzos terminan degradando y reduciendo la vida útil del sistema aislante de los generadores.

Las barras del estator sometidas a la combinación simultánea de los esfuerzos indicados conducen después de cierto tiempo a un deterioro gradual de envejecimiento. El deterioro continuo del sistema de aislamiento puede conducir a una falla significativa después de ciertos periodos de operación prolongada. Los síntomas del deterioro pueden detectarse mediante procedimientos físico y químico, sometiendo el aislamiento de las barras a un programa integral de pruebas multidisciplinarias, que nos permiten determinar la integridad del aislamiento y proporcionarnos de este modo una estimación empírica de la extensión de vida del aislamiento basado en ciertos criterios.

El protocolo de pruebas realizado se correlacionara con el nivel de ruptura dieléctrica que presenten las barras o bobinas a fin de estimar el tiempo de envejecimiento y los mecanismos de falla más significativos.

3 CASOS DE ESTUDIO

3.1 Caso No. 1:

Barras de Generador Eléctrico de 200 MVA, 16 kV, Fabricado en 1982, Aislamiento Mica/resina epoxica, Clasificación térmica “F”.

TABLA II PRUEBAS DIELECTRICAS

Barra No.	**% F.D.**	**Dtand**	**A. T. (kV)**	**DP (nC)**
202 I	0.772	0.266	73	**

254 S	0.693	1.17	75	**

Nota: Ver Espectros de DP´s

La trayectoria de falla del aislamiento, posterior a la prueba de A. T., muestra la contribución del tracking eléctrico iniciado por pliegues en el aislamiento principal

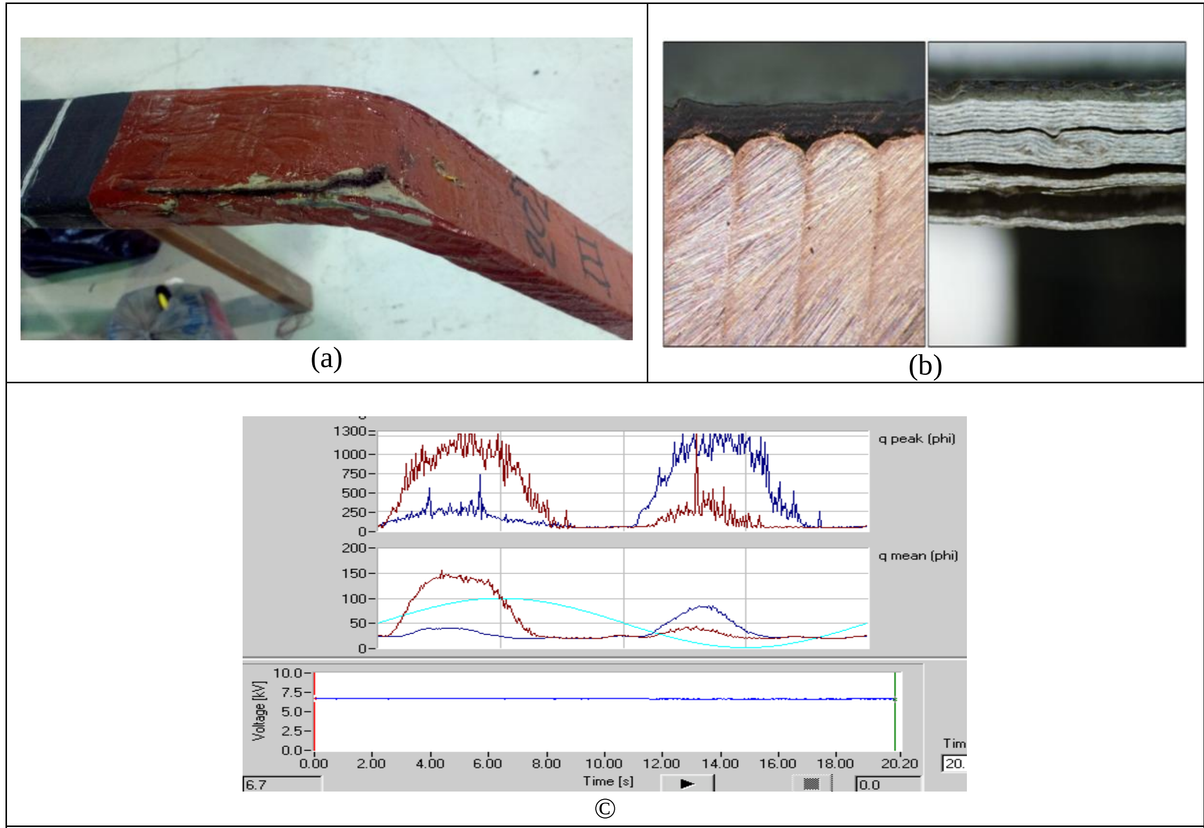


Fig. No. 1: (a) La trayectoria de falla del aislamiento, posterior a la prueba de A. T., muestra la contribución del tracking eléctrico iniciado por pliegues en el aislamiento principal; (b), Se observa delaminación del aislamiento en las capas de aislamiento adyacentes a los subconductores de cobre; (c), El espectro de Descargas parciales tiene predominancia positiva, lo cual corrobora las observaciones del inciso (b).

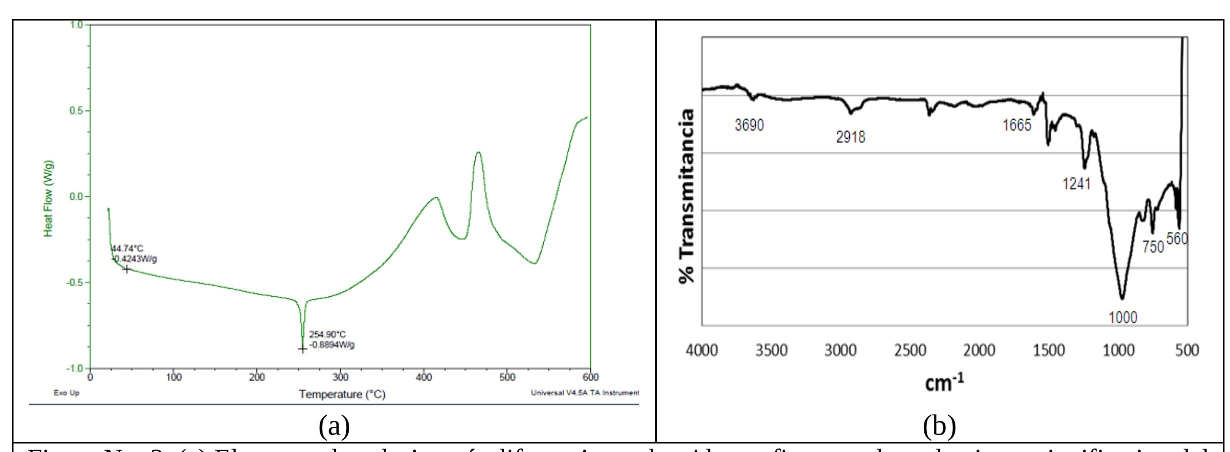


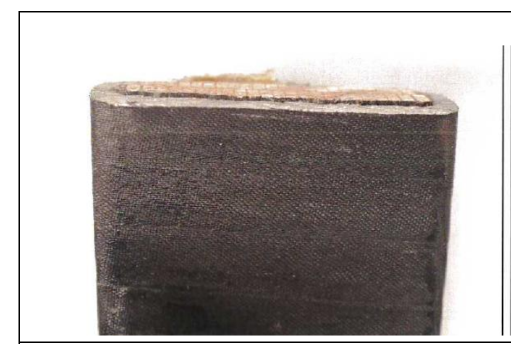
Figura No. 2: (a) El ensayo de calorimetría diferencia por barrido confirma un degradamiento significativo del aislamiento principal debido a una respuesta de re cristalización de la mica; evidenciando una fragilización de la mica y perdida de sus propiedades mecánica y por ende eléctricas; (b), El estudio de espectroscopia infrarroja de Fourier “espectro IR”, muestra un bajo porcentaje de resina en el aislamiento, lo que impacta negativamente el grado de adherencia del volumen del aislamiento principal a tierra

3.2 Caso de Estudio No. 2

Barras de Generador de 50 MVA, 13.8 kV, Fabricado 1973, Aislamiento Mica/asfalto Clasificación térmica “B”, 256,009 Hrs. Operación.

TABLA II PRUEBAS DIELECTRICAS

Barra	% F. D.	Δtanδ	A. T. (kV)	DP (nC)
41 S	2.025	0.121	80	0
112 S	1.376	0.653	70	14
67 S	1.439	0.217	60	19
Nueva	1.701	0.00	82	40



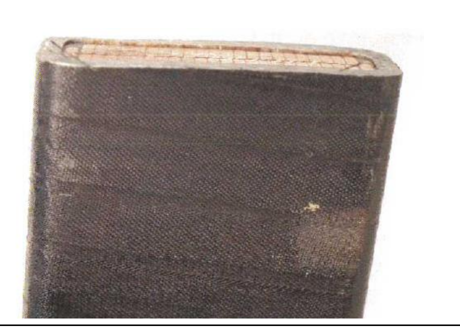


Figura No. 3: Se observa falta de adherencia entre subconductores de cobre y aislamiento Mica/Resina Epoxica

4.2.1 Pruebas Físico-Químicas:

Del estudio de espectrometría de la muestra de aislamiento de la barra usada, Índice IR, Alrededor de los 1700 cm-1 esta una banda característica a grupos OH no retenidos en la mica, lo cual manifiesta una deshidratación del material, corroborando esto la perdida de adherencia del volumen del aislamiento principal a tierra que ocasiono el desplazamiento de los conductores de cobre observados en la microfotografía de la barra usada.

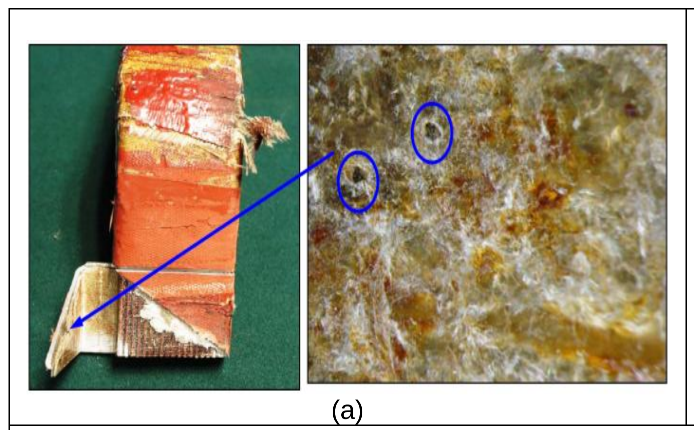
3.3 Caso de estudio No. 3

Barras de Generador Eléctrico de 225 MVA, 13.8 kV, Fabricado en 1978, Aislamiento Mica/Resina Epoxica, Clasificación térmica “F”

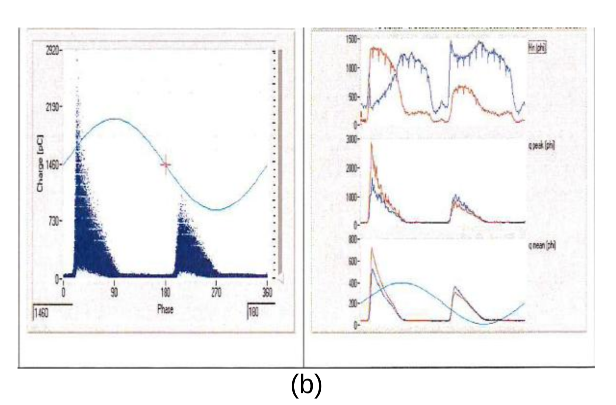
TABLA III: PRUEBAS DEILECTRICAS

Barra No.	%F.D	Dtand	A. T. (kV)	Espectro de DP´S
B-430 U1	1.30	2.13	55	**
B-355 u5	0.773	0.433	40	**

B-ASEA	0.898	0.413	59	**
B-Genermx	2.17	0.08	64	**



(a)



(b)

Figura No. 4: (a) Se pueden apreciar ligeras perforaciones del aislamiento debido a las DP´S; (b) Se observa predominancia positiva, lo cual es característico de delaminación del aislamiento próximo a los subconductores de cobre, lo cual se aprecia en la siguiente foto

4 CONCLUSIONES

- No se encontró correlación entre la magnitud de la descarga parcial y la ruptura dieléctrica del aislamiento. El caso No. 2 mostro que aún y cuando las descargas parciales en la barra No. 1 fueron menores que en la barras No. 3 (35 y 65 nC, respectivamente), La tensión de rompimiento fue de 80 y 60 kV, comportamiento contrario a lo esperado, algo similar ocurrió en los otros casos.
- En los Caso No. 1 y 3 considerando el espectro de descargas parciales versus la microscopia del aislamiento principal a tierra, hubo correlación con el mecanismo de degradamiento encontrado en la disección “Delaminación del aislamiento próximo a los subconductores”.
- En la fotografía del aislamiento en desarrollos de la barra No. 254 E, posterior al rompimiento dieléctrico (caso 1), se observó cómo contribuyeron los pliegues superficiales del aislamiento principal a la formación de tracking dieléctrico que inicio la avalancha de electrones que culminaron en la tensión disruptiva del aislamiento. Lo anterior, implica que problemas de calidad en la fabricación de las barras, como pliegues en las capas de aislamiento contribuyen a la formación de cracks y tracking eléctrico que reducen la rigidez dieléctrica del aislamiento; por lo que se sugiere, efectuar un buen control de calidad y atestiguamiento de la fabricación y pruebas en fábrica de las bobinas.
- La medición de factor de disipación en su procedimiento estándar de medición no tiene la capacidad de discriminar si el mecanismo de envejecimiento es interno o externo, ya que no puede segregar las perdidas dieléctricas de los revestimientos graduadores de campo eléctrico.

En los casos analizados, se observó la contribución de los espectros de descargas parciales para detectar los síntomas de múltiples mecanismos de degradamiento del aislamiento principal; los cuales, si se atienden con oportunidad contribuirán a evitar fallas e incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los generadores

5 REFERENCIAS

[1] Hydrogenerator Failures – Results of the Survey, CIGRE Study Committee SC11, G11.02, 2002.

[2] C. Sumereder. Statistical Lifetime of Hydro Generator and Failure Analysis. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5 No. 3 (2008) pp. 678-685.

[3] P. A. Edvardsen, Life time reduction of hydro generator stator winding as a consequence of frequent start/stop.ICEM 2000,Espoo Finland,pp. 851-853

[4] R. Bartnikas, R. Morin. Multi-Stress Ageing of Stator Bars with Electrical, Thermal, and Mechanical

Stresses as Simultaneous Acceleration Factors. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 702-714, Dec 2004